

**RANCANG BANGUN ALAT UJI TARIK UNTUK KARAKTERISASI SIFAT
MEKANIK DAN LISTRIK PADA MATERIAL KONDUKTIF FLEKSIBEL
DEVELOPMENT OF TENSILE TEST MACHINE FOR MECHANICAL AND
ELECTRICAL PROPERTIES CHARACTERIZATION OF FLEXIBLE CONDUCTIVE
MATERIAL**

Christo Sebastian Kristena¹, Ismudiati Puri Handayani², Indra Chandra³

^{1,2,3}Program Studi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Telkom University

¹kristena.cs15@gmail.com, ²iphandayani@telkomuniversity.ac.id, ³idc.indra.chandra@gmail.com

Abstrak

Elektronik fleksibel merupakan sebuah peranti elektronik yang memanfaatkan material konduktif atau semikonduktor yang dideposisi di atas substrat fleksibel. Karena bentuknya yang mudah diubah, elektronik fleksibel memiliki banyak kegunaan dalam kehidupan sehari-hari, contohnya, sebagai sensor elastis yang dapat diletakkan pada pakaian atau organ tubuh untuk memantau kinerja dari tubuh manusia dan perangkat yang dapat ditekuk. Sifat fleksibel ini dapat meningkatkan ketahanan dari sebuah rangkaian elektronik karena tidak mudah patah. Dalam mengaplikasikan elektronik fleksibel, perlu diperhatikan pengaruh tarikan mekanik terhadap sifat mekanik dan listrik bahan tersebut. Substrat elastis harus dipilih yang mampu mempertahankan sifat elastisitasnya. Selain itu elemen konduktif yang dideposisi di atas substrat fleksibel harus dijaga agar secara fisis tidak rusak dan masih memiliki sifat listrik yang sama meskipun sudah mengalami tarikan mekanik berkali-kali. Mempertimbangkan hal ini, telah dirancang dan dikembangkan alat uji tarikan pada material konduktif fleksibel untuk mempelajari sifat mekanik material dan hubungan antara sifat mekanik dengan sifat listrik dari material tersebut. Bagian bidang penarik pada alat uji tarikan ini dibuat dengan dimensi 15 x 8 x 3 cm sehingga dapat diintegrasikan dengan alat uji lain seperti mikroskop yang dapat digunakan untuk mengamati perubahan fisik bahan yang diuji. Hasil pengujian tanpa beban, menunjukkan bahwa alat mampu memberikan gaya maksimum sebesar 26,59 N dan bergeser secara simetris sebesar 40,00 mm pada saat gaya maksimum diterapkan. Gaya dapat divariasi dengan resolusi sebesar 0,14 N sedangkan pergeseran memiliki resolusi sebesar 0,02 mm. Pengujian alat untuk mengkarakterisasi substrat *polyethylene terephthalate* (PET) dengan ukuran 6,50 x 3,80 x 0,17 mm menunjukkan alat mampu memberikan gaya maksimum sebesar 2,16 N dengan variasi terkecil 0,14 N serta pergeseran maksimum sebesar 0,16 mm dan variasi pergeseran terkecil 0,01 mm. Pada saat elemen konduktif pasta perak dideposisi di atas PET dan diuji dengan alat ini, diperoleh informasi bahwa resistansi relatif stabil pada saat material ditarik dengan regangan 0,10 % dan bertambah hingga sekitar 10,00 Ω pada saat penarikan dengan besar regangan 1,00%. Hasil karakterisasi dua elemen konduktif yang berbeda resistansi juga memperlihatkan bahwa material yang lebih konduktif cenderung lebih stabil terhadap tarikan mekanik.

Kata Kunci : Alat uji tarikan, *flexible electronics*, material konduktif fleksibel

Abstract

Flexible electronics is an electrical device using flexible substrate in which a conductive or a semiconducting material is deposited on it. Due to the capability of changing its geometry, flexible electronics has many applications, such as elastic sensor or bendable devices that can be put on clothing or human's organ to examine human body performance. To apply flexible electronics into devices, it is important to understand the effects of mechanical tensile force to the mechanical and electrical properties of the material. The material should be able to maintain its elasticity, physical properties, as well as electrical properties after experiencing mechanical tensile forces for many times. Considering to this issue, a mechanical test instrument has been designed and built to characterize the mechanical properties of flexible conductive material and to study the correlation between mechanical and electrical properties of the material. The instrument is connected to digital microscope so that any physical changes of the material including any possible damages after mechanical stretches are observed. The instrument is able to generate a maximum force of 26.59 N and a maximum displacement of 40.00 mm. The smallest variation of the mechanical force and displacement are 0.14 N and 0.02 mm, respectively.

The instrument is able to generate a maximum force of 2.16 N on 6.50 x 3.80 x 0.17 mm PET. This force triggers a maximum stretch of 0.13 mm. The smallest stretch is 0.01 mm. This mechanical stretch affects the material resistance. The resistance of silver paste deposited on top of PET is observed to be relatively constant when 0,10% strain is applied. However, this resistance changes about 10,00 Ω when 1,00% strain is applied. Less resistive material is observed to be more stable against the mechanical strain.

Keywords: *Conductive material, flexible electronics, PET, tensile test instrument*

1. Pendahuluan

Elektronik fleksibel merupakan sebuah rangkaian elektronik yang dibuat dengan mendeposisikan elemen konduktif pada substrat elastis, seperti *polyethylene terephthalate* (PET) ^[1], *polyether ether ketone* (PEEK) ^[2], dan *polydimethyl siloxane* (PDMS) ^[3]. Dengan menggunakan substrat fleksibel sebagai alas pendeposisian, diharapkan rangkaian elektronik ini dapat diubah bentuknya sesuai dengan berbagai kebutuhan. Dalam bidang medis, *flexible electronics* diharapkan mampu dibuat menjadi sensor yang dapat diimplankan pada tubuh manusia untuk memantau kinerja tubuh manusia ^[4]. Dalam bidang energi, *flexible electronics* ini dapat digunakan sebagai sebuah panel surya sehingga panel surya yang fleksibel ini dapat diletakkan di berbagai tempat, seperti atap mobil, atap rumah, maupun berbagai tempat lain dengan tujuan tidak memakan lahan berlebih ^[5]. *Flexible electronics* juga dapat dikembangkan menjadi pakaian pintar, di mana pakaian ini dapat diintegrasikan dengan berbagai sensor dan peranti sehingga mampu memberikan berbagai macam fitur tambahan seperti kemampuan untuk memantau dan mengontrol suhu tubuh dengan mengintegrasikan pemanas maupun pendingin, maupun kemampuan untuk mengakses ponsel pintar tanpa membuka ponsel tersebut.

Dalam merealisasikan elektronik fleksibel ini, banyak hal dan kendala yang dihadapi, salah satunya adalah pemilihan material fleksibel dan elemen konduktif. Material fleksibel yang digunakan harus mampu menerima gangguan mekanik, seperti tarikan maupun tekukan, tanpa terjadi deformasi sehingga secara fisik tidak ada kerusakan yang mampu mempengaruhi sifat listrik yang dimilikinya ^[6]. Untuk elemen konduktif, diperlukan elemen konduktif yang mampu mempertahankan resistansinya meskipun diberikan gangguan mekanik. Nilai resistansi ini menjadi penting karena akan mempengaruhi transmisi listrik yang dilakukan oleh *flexible electronics* dan akan mempengaruhi kinerja keseluruhan yang dimiliki oleh peranti.

Untuk menghadapi berbagai kendala tersebut, diperlukan sebuah alat yang mampu melakukan pengujian terhadap substrat elastis dan elemen konduktif. Alat ini harus mampu memberikan gangguan mekanik pada substrat uji dan melakukan pengukuran secara mekanik maupun elektrik untuk melihat potensi dari substrat yang diujikan. Tujuan dari jurnal ini adalah merancang dan membuat alat uji tarik yang efisien guna menemukan substrat fleksibel dan elemen konduktif yang cocok untuk *flexible electronics*.

2. Perancangan dan Realisasi Sistem

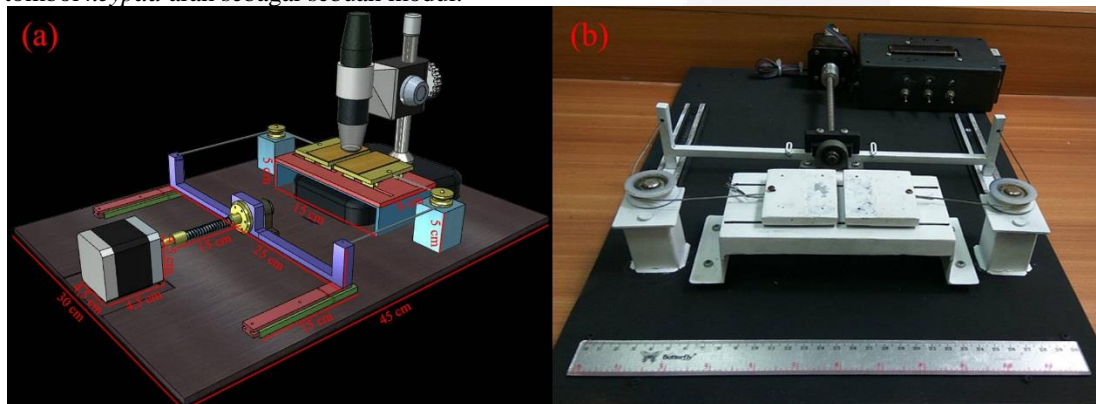
2.1. Perancangan

Perancangan alat uji dilakukan secara digital dengan perangkat lunak Autodesk 123D Design. Perancangan yang dilakukan meliputi bentuk alat uji, dimensi serta material. Kemudian alat uji dibuat dengan menggunakan logam agar memiliki ketahanan yang kuat. Untuk menghindari karat, alat uji kemudian akan di cat dengan cat semprot. Untuk komponen yang sulit dijumpai, seperti katrol mini dan rel pipih, akan dibuat dengan memodifikasi dari komponen lain yang mudah dijumpai namun memiliki keidentikan cara kerja. Untuk mengurangi gaya gesek pada bagian rel, katrol dan bidang penarik, maka akan ditambahkan *grease*. Alat uji yang telah dibuat selanjutnya diuji coba dengan menggunakan PET. Jika berhasil melakukan penarikan terhadap PET, maka selanjutnya dilakukan karakterisasi untuk melihat spesifikasi dari alat uji ini. Spesifikasi alat uji yang akan dikarakterisasi meliputi gaya maksimum yang dimiliki alat, regangan minimum hingga maksimum yang dialami oleh PET, variasi

kecepatan alat yang mungkin diberikan saat uji coba bahan, serta pengukuran perubahan resistansi terhadap elemen konduktif yang dideposisikan di atas PET. Hasil dari rancangan dan karakterisasi selanjutnya dibuat untuk menjadi laporan tugas akhir.

2.2 Realisasi Alat

Alat uji tarik yang telah dibuat memiliki 3 komponen penting, yaitu aktuator, bidang penarik dan pengontrol. Aktuator yang digunakan adalah *stepper motor* NEMA 17 dengan torsi 54 N cm dan arus masukan sebesar 1,8A. *Stepper motor* dipilih sebagai aktuator karena sifatnya yang mudah dikendalikan dengan pengontrol mikro dan mampu memberikan kepresisian pada saat beroperasi sehingga dapat memberikan jarak dengan orde mikro meter tanpa terjadi nilai kesalahan yang besar. Selanjutnya, *stepper motor* dihubungkan dengan ulir dengan diameter 8 mm yang terintegrasi dengan rel sehingga gerakan rotasi dari *stepper motor* akan diubah menjadi gerakan translasi. Ujung ulir, yang terhubung dengan rel, akan dihubungkan dengan kawat seling yang sudah terikat pada sisi kiri dan kanan bidang penarik sehingga pada saat terjadi penarikan akibat *stepper motor* berputar berlawanan arah jarum jam, bidang penarik akan ikut tertarik. Substrat uji akan diletakkan di atas bidang penarik dengan lem *cyanoacrylate* dan dibantu oleh kayu sebagai media penghubung. Kayu digunakan sebagai media penghubung karena baik kayu maupun substrat, keduanya memiliki kandungan karbon, sehingga diharapkan daya lekat menjadi lebih kuat. Untuk mengendalikan *stepper motor* digunakan *driver* A4988. *Driver* ini memungkinkan *stepper motor* untuk melakukan *micro-stepping* yaitu memperkecil derajat 1 *step* sehingga dihasilkan tingkat kepresisian yang lebih tinggi serta menjaga substrat uji agar tidak tertarik oleh gaya yang besar dalam durasi yang singkat (terhentak) sehingga cepat terdeformasi. Untuk memberikan perintah pada alat uji, pengguna dapat memilih jenis penarikan serta memasukkan variabel yang diperlukan, yaitu kecepatan penarikan, derajat jarak penarikan serta siklus penarikan (untuk mode siklus). Semua pemilihan ini ditampilkan dengan layar LCD 16 x 2 yang sudah terintegrasi dengan tombol *keypad* arah sebagai sebuah modul.



Gambar 1. (a) Perancangan 3 dimensi alat uji, (b) realisasi alat uji

3.2 Fitur pada Alat Uji

Untuk mengamati ketahanan dan konduktivitas substrat uji, di berikan 2 mode penarikan, yaitu mode penarikan normal dan mode penarikan siklus. Sebelum mengoperasikannya, pengguna harus terlebih dahulu memilih mode penarikan tersebut pada *display* (Gambar 2). Mode penarikan normal merupakan mode penarikan yang memungkinkan alat untuk menarik substrat uji sejauh jarak yang sudah dimasukkan oleh pengguna. Mode penarikan ini digunakan untuk melihat regangan maksimal yang dapat diterima oleh substrat uji sebelum kehilangan elastisitas serta sebelum terjadi perubahan resistansi yang cukup besar. Mode penarikan kedua, yaitu mode penarikan siklus, merupakan mode penarikan yang bertujuan untuk melihat ketahanan substrat uji ketika diberikan gangguan berulang berupa penarikan sesuai jarak yang telah dimasukkan oleh pengguna, kemudian dikembalikan kembali ke posisi semula (regangan 0,00%). Penarikan dan penguluran ini dilakukan selama jumlah siklus yang juga dimasukkan oleh pengguna. Variabel lain yang perlu dimasukkan oleh pengguna adalah kecepatan penarikan, dalam orde mm/s. Untuk mengoptimalkan pengujian, kami mengintegrasikan mikroskop

untuk melihat secara fisik perubahan yang terjadi ketika regangan diberikan pada substrat uji. Untuk menjadi *flexible electronics* yang baik, substrat elastis dan elemen konduktif tidak boleh terdeformasi ketika diberikan regangan dengan nilai tertentu. Deformasi dikhawatirkan akan mengurangi nilai konduktivitas yang dimiliki oleh elemen konduktif sehingga tidak dapat mengalirkan arus listrik dengan baik yang dapat membuat kinerja dari *flexible electronics* yang dibuat menjadi tidak optimal. Untuk melihat perubahan resistansi dari elemen konduktif, ditambahkan juga multimeter. Memantau nilai resistansi menjadi penting karena dengan meningkatnya nilai resistansi, maka nilai arus yang dialirkan akan menurun.



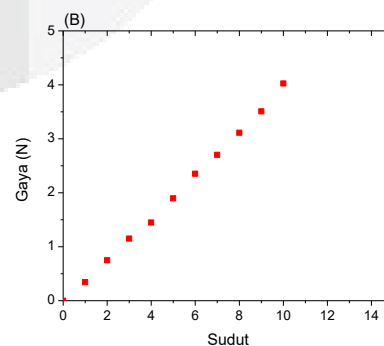
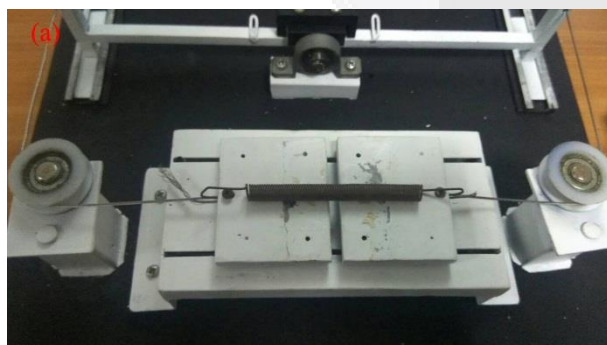
Gambar 2. (a) Tampilan pemilihan mode pada LCD, (b) susunan alat pada saat pengujian

3.3. Karakterisasi Alat

Setelah alat uji berhasil dibuat, dilakukan beberapa pengukuran, antara lain karakterisasi alat untuk melihat besar gaya maksimum yang dimiliki oleh alat uji, pengukuran alat dengan beban PET untuk melihat kemampuan alat pada saat melakukan penarikan pada substrat elastis, serta pengukuran alat dengan beban PET yang telah terdeposisi pasta perak untuk melihat kemampuan alat pada saat melakukan pengukuran sifat listrik.

Pada karakterisasi gaya maksimum pada alat, alat uji diberikan beban berupa pegas dengan 2 jenis konstanta, yaitu pegas A dengan nilai 7,47 N/mm dan pegas B dengan nilai 0,57 N/mm. Pegas A digunakan untuk mengkarakterisasi gaya maksimum dari alat uji, sementara pegas B dilakukan untuk melakukan karakterisasi gaya tiap 1° perputaran *stepper motor*. Penentuan besar konstanta pegas dilakukan dengan mengaitkan beban seberat 2 kg pada pegas, kemudian diukur perubahan panjang pegas (Δx) dengan menggunakan jangka sorong. Besar gaya merupakan perkalian antara beban yang dikaitkan dengan percepatan gravitasi, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Sehingga dapat dimasukkan pada persamaan 1:

$$k = \frac{F}{\Delta x} \quad (1)$$



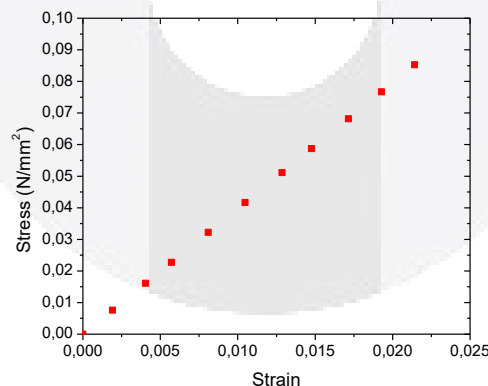
Gambar 3. (a) Proses karakterisasi gaya alat dengan pegas, (b) grafik perubahan sudut terhadap gaya pada saat karakterisasi dengan pegas B ($k = 0,57 \text{ N/mm}$).

Gambar 4 (a) merupakan proses karakterisasi gaya alat dengan mengaitkan pegas A pada bidang penarik. *Stepper motor* dibiarkan berputar dan menggerakkan bidang penarik sampai tidak mampu lagi untuk berputar akibat tertahan oleh pegas A (*stuck*). Pada keadaan ini, perubahan panjang yang muncul pada pegas diukur dengan jangka sorong dan kemudian dimasukkan ke dalam persamaan (1) untuk menghitung besar gaya yang dimilikinya. Hasil dari perhitungan menunjukkan bahwa gaya maksimal bernilai 26,59 N. Sementara untuk karakterisasi gaya tiap sudut dengan pegas B, perputaran motor diatur tiap derajatnya. Perputaran yang diberikan adalah sebesar 5° dan dilakukan sebanyak 10 kali pengukuran. Sementara suplai arus yang diberikan pada *stepper motor* adalah sebesar 2 A. Hasil pengukuran ini ditampilkan pada grafik di Gambar 4 (b). Pada grafik, perubahan sudut terhadap besar gaya yang dimiliki oleh bidang penarik cenderung linear. Hal ini menunjukkan bahwa pada setiap derajat perputaran *stepper motor*, gaya yang dimiliki oleh bidang penarik adalah sama sehingga pada saat melakukan pengujian, substrat akan menerima besar gaya yang sama setiap 5 derajat yaitu sebesar 0,13 N. Untuk memberikan gaya yang lebih besar tiap derajatnya, dapat dilakukan penambahan arus suplai pada *stepper motor*.

3. Karakterisasi Material

3.1. Pengujian dengan Beban PET

Pengujian kedua dilakukan dengan melekatkan substrat PET pada bidang penarik. Pada pengujian ini, ingin didapatkan data berupa grafik *strain-stress* dengan melakukan penarikan terhadap PET (Gambar 5). Substrat PET yang diujikan dalam pengujian ini memiliki dimensi panjang x lebar x tebal berturut-turut sebesar 6,50 x 3,80 x 0,17 mm. PET dilekatkan pada bidang penarik dengan lem *cyanoacrylate* dengan bantuan kayu sebagai media pelekatan. Kayu dipilih sebagai media karena baik kayu maupun PET sama-sama memiliki unsur karbon sehingga daya lekat akan menjadi lebih kuat. Dari grafik pada Gambar 3.4, PET yang diujikan masih berada dalam bagian elastis pada pemberian 2,10% *strain*. Hal ini ditunjukkan dengan bentuk grafik yang masih linear. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali dengan besar perputaran motor sejauh 5° untuk setiap pengujian. Untuk memberikan *strain* sejauh 1,00% pada substrat PET, diperlukan gaya sebesar 0,67 N dari alat uji. Jika dibandingkan dengan derajat perputaran motor, maka motor berputar sejauh 25° untuk memberikan gaya sebesar itu. Jika dibandingkan dengan gaya maksimum yang dimiliki oleh alat uji, substrat PET masih dapat tertarik lebih jauh lagi jika diberikan sudut perputaran motor yang lebih besar. Untuk memberikan gaya yang lebih besar dari gaya maksimum, suplai arus pada motor dapat diperbesar.



Gambar 4. Kurva *strain-stress* dari substrat PET.

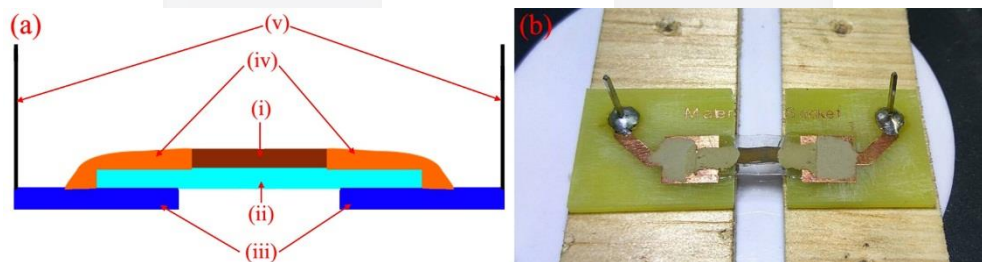
3.3.2. Pengujian dengan Beban PET yang Telah Dideposisi Pasta Perak

Pengujian ketiga dilakukan dengan mengganti substrat uji dengan PET yang diatasnya telah dideposisi pasta perak. Kali ini, besar resistansi yang dimiliki oleh substrat diukur dengan multimeter untuk melihat pengaruh sifat listrik terhadap sifat mekanik. Pengukuran ini dilakukan dalam suhu ruang, yaitu 25°C . Gambar 5 merupakan pasta perak yang telah dideposisi diatas PET dan kemudian dilekatkan

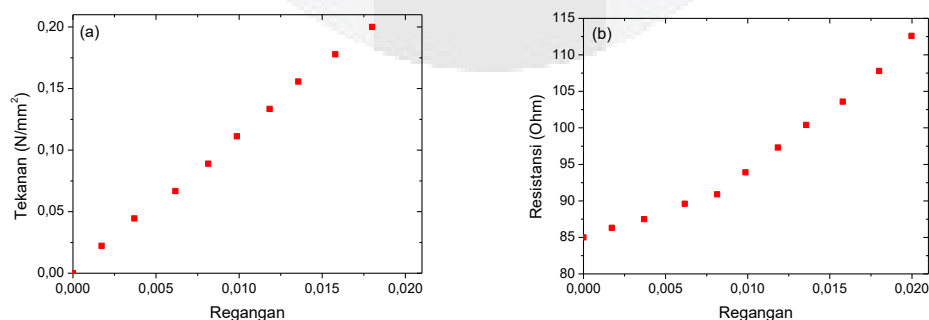
pada elektroda. Di ujung elektroda diberikan *male pin header* untuk mencapitkan multimeter agar perubahan resistansi dapat diamati. Pada pengujian ini, gaya yang diberikan oleh alat uji pada substrat PET dianggap diteruskan sepenuhnya pada pasta perak yang telah terdeposisi. Grafik (a) pada Gambar 6 menunjukkan grafik yang cenderung linear. Dalam 10 kali penarikan di sudut yang sama, regangan yang terjadi pada substrat ketika stepper motor bekerja sejauh 50° adalah sebesar 1,99%. Nilai ini lebih kecil dari nilai regangan PET tanpa pasta perak pada perputaran sejauh 50° , yaitu mencapai 2,14%. Hal ini terjadi karena pasta perak yang dideposisikan diatasnya menambah ketananan dari substrat uji sehingga membutuhkan gaya yang lebih besar dalam penarikannya.

Grafik pada Gambar 6 bagian (b) menunjukkan perubahan resistansi yang dimiliki oleh pasta perak pada saat diberikan regangan mekanik. Resistansi awal yang dimiliki oleh pasta perak adalah sebesar 85 Ω . Pada saat diberikan penarikan dengan strain sebesar 0,17%, resistansi mengalami kenaikan menjadi 86,30 Ω . Sampai strain sebesar 0,81%, perubahan resistansi yang terjadi masih cenderung linear. Pada saat strain diberikan sebesar 0,99%, mulai terjadi lonjakan kenaikan resistansi yaitu sebesar 3,00 Ω dari besar resistansi sebelumnya. Selanjutnya resistansi bertambah secara eksponensial. Pada pemberian strain sebesar 1,99%, resistansi naik menjadi 112,60 Ω . Hal ini mengindikasikan bahwa resistansi yang dimiliki oleh pasta perak masih belum stabil dan mudah berubah jika diberikan regangan yang cukup besar dikarenakan pasta perak masih belum siap untuk digunakan sebagai elemen konduktif karena belum kering sepenuhnya.

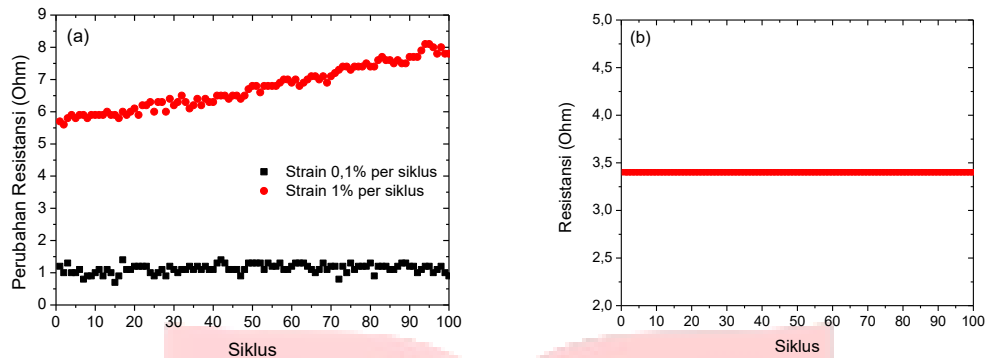
Pada grafik (a) di Gambar 7, ditampilkan kemampuan pasta perak dalam mempertahankan resistansinya ketika diberikan strain sebesar 0,10% dan 1,00%. Pada saat diberikan strain sebesar 0,10%, resistansi yang dimiliki oleh pasta perak masih cenderung menunjukkan hasil yang stabil setelah diberikan penarikan sebanyak 100 kali. Sementara pada saat diberikan strain sebesar 1,00%, resistansi yang dimiliki oleh pasta perak terus meningkat dan meningkat dengan cukup besar setelah diberikan penarikan sebanyak 40 siklus. Sebagai perbandingan, pada Gambar 7 (b), ditampilkan nilai resistansi yang stabil di nilai 3,4 Ω bahkan setelah 100 siklus. Elemen konduktif yang digunakan pada grafik ini merupakan elemen konduktif yang telah dideposisikan dalam waktu 2 bulan.



Gambar 5. (a) Ilustrasi material yang diuji; (i) pasta perak yang telah dideposisikan diatas substrat elastis, (ii) substrat elastis PET, (iii) elektroda tembaga, (iv) pasta perak untuk menghubungkan elemen konduktif dengan elektroda, (v) *pin header* untuk menghubungkan multimeter, (b) realisasi dari material yang diujikan



Gambar 6. (a) Kurva *strain-stress* untuk substrat PET yang telah dideposisikan pasta perak diatasnya, (b) kurva regangan terhadap perubahan resistansi.



Gambar 7. Grafik perubahan resistansi yang terjadi ketika diberikan penarikan sebanyak 100 siklus; (a) perubahan resistansi pada substrat yang berumur 4 hari, (b) besar resistansi pada substrat yang berumur 2 bulan.

4. Kesimpulan

Desain alat uji mekanik telah berhasil direalisasikan. Karakterisasi alat menunjukkan, saat tidak ada beban gaya, maksimum yang dihasilkan oleh alat uji 26,59 N dan mampu bergeser sejauh 40,00 mm dengan resolusi sebesar 0,02 mm. Ketika diberikan beban berupa lembaran PET dengan dimensi 6,50 x 3,80 x 0,17 mm, gaya maksimum yang dapat diberikan oleh alat ini adalah sebesar 2,16 N dengan pergeseran maksimum sebesar 0,16 mm dan resolusi 0,01 mm. Karakterisasi pasta perak di atas substrat PET menunjukkan bahwa resistansi relatif stabil pada saat material ditarik dengan gaya sebesar 0,0035 N dengan menghasilkan regangan sebesar 0,10% dan bertambah hingga sebesar 10,00 Ω pada saat diberikan gaya sebesar 0,0021 N dan menghasilkan regangan sebesar 1,00%. Hasil karakterisasi juga memperlihatkan bahwa material yang lebih konduktif cenderung lebih stabil terhadap tarikan mekanik. Untuk menghasilkan elemen konduktif pasta perak yang baik, diperlukan waktu sekitar 2 bulan dalam suhu ruang tanpa adanya perlakuan khusus.

Daftar Pustaka

- [1] I. M. Ward, *Sage*, vol. 31, pp. 650 – 664, 1961.
- [2] D. P. Jones, D. C. Leach and D. R. Moore, *Elsevier*, vol. 26, pp. 1385 – 1393, 1985.
- [3] X. Z. Liu, S. L. Peng, L. Y. Liu, W. J. Wen and P. Sheng, *Advanced Materials*, vol. 19, pp. 2682 – 2686, 2007.
- [4] C. Z. Liao, M. Zhang, M. Y. Yao, T. Hua, L. Li and F. Yan, *Advanced Materials*, vol. 27, pp. 7493 – 7527, 2015.
- [5] M. C. Barr, J. A. Rowe, R. R. Lunt, A. Wang, C. M. Boyce, S. G. Im, V. Bulovic and K. K. Gleason, *Advanced Material*, vol. 23, pp. 3500 – 3505, 2011.
- [6] Y. S. Chaug, J. E. Haubrich, M. Sereda and R. C. Liang, *MRS Proceedings*, vol. 814, pp. I9.6., 2004.